

2. PETUNJUK DAN BUKTI EVOLUSI

Standar Kompetensi :

4. Memahami teori evaluasi serta implikasinya pada salingtemas.

Kompetensi Dasar :

4. 1 Menjelaskan teori, prinsip, dan mekanisme evolusi Biologi.

Materi Pokok : Petunjuk Pendukung Evolusi

È k s p l o r a s i

Selama lebih dari seratus tahun, argumen pro dan kontra terhadap teori evolusi telah diteliti dan diperdebatkan. *Benarkah evolusi itu ada? Apa buktinya kalau evolusi itu ada?* Untuk menunjukkan bukti-bukti bahwa proses evolusi itu ada, kita dapat melakukan pendekatan terhadap kenyataan/fakta yang ada di sekitar kita. Bagi para spesialis di bidang biologi dan disiplin ilmu lain yang berkaitan, mungkin pertanyaan tersebut sudah terjawab. Akan tetapi, bagaimana bagi kelompok lain yang tidak mempunyai kesempatan untuk mengikuti jalannya perkembangan teori evolusi?

Para ahli berpendapat bahwa makhluk hidup selalu mengalami perubahan secara perlahan-lahan dalam jangka waktu yang lama, dalam hitungan jutaan tahun. Perubahan-perubahan itu dapat berjalan jauh menyimpang dari struktur aslinya sehingga menimbulkan spesies baru. Jadi tumbuhan dan hewan yang ada sekarang ini bukanlah makhluk hidup yang pertama menghuni bumi ini, tetapi berasal dari makhluk hidup di masa lampau yang telah mengalami perubahan. Sehingga muncul pula pertanyaan utama “bagaimana perubahan-perubahan itu terjadi?”. Adanya hewan dan tumbuhan yang beranekaragam menumbuhkan keinginan manusia untuk mengetahui nenek moyangnya.

Pernahkah kita berpikir, siapakah nenek moyang kita? Dari berbagai proses pengamatan, bukti yang ada, dan penelitian yang dilakukan para ahli, akhirnya muncul suatu teori evolusi. Berdasarkan data atau petunjuk yang ada, makhluk hidup (hewan dan tumbuhan) telah menghuni bumi jutaan tahun yang lampau. Jenis-jenis yang hidup pada masa lampau tersebut berbeda dengan jenis yang hidup pada masa sekarang ini. Bahkan beberapa jenis hewan dan tumbuhan purba saat ini telah punah, tinggal fosilnya saja.

P e n g e n a l a n k o n s e p

A. Petunjuk Adanya Evolusi

Evolusi dapat dilihat dari dua segi, yaitu sebagai proses historis dan cara bagaimana proses itu terjadi. Sebagai proses historis, evolusi telah dipastikan secara menyeluruh dan lengkap, sebagaimana yang telah dipastikan oleh ilmu tentang suatu kenyataan mengenai masa lalu yang tidak dapat disaksikan oleh mata. Untuk menunjukkan bukti-bukti bahwa proses evolusi itu ada, kita dapat melakukan pendekatan terhadap kenyataan yang ada. Kenyataan-kenyataan yang ada terus diinterpretasikan oleh para ahli dan dijadikan bahan bukti evolusi.

Para ahli menggunakan bukti-bukti sebagai petunjuk evolusi dengan tujuan akhir ingin mencari jawaban tentang fenomena alam, sebagaimana yang terdapat dalam buku “On The Origin Species” karya Charles Darwin. Sebenarnya rambu-rambu untuk mencari bukti telah ada dalam buku Darwin, sedangkan petunjuk adalah rambu-rambu untuk memperoleh bukti, dengan alasan bahwa pendekatan monodisipliner tidak dapat dijangkau atau dilihat dan fosil bukti tidak dapat dipakai bukti dan kurang kuat. Hal ini karena fosil merupakan benda mati yang sudah tidak utuh dan lengkap, sehingga interpretasi para ahli sangat dituntut ketajamannya. Apalagi perilaku organisme yang telah memfosil sulit sekali diinterpretasi.

Untuk menunjukkan bukti-bukti bahwa proses evolusi itu ada, kita dapat melakukan pendekatan terhadap kenyataan/fakta yang ada di sekitar kita. Walaupun dapat tidaknya kenyataan-kenyataan tersebut dijadikan bahan bukti adanya evolusi tergantung dari interpretasi para pakar yang bersangkutan. Beberapa petunjuk adanya evolusi, yaitu :

1. Peninggalan fosil di berbagai lapisan batuan bumi.
2. Anatomi perbandingan.
3. Adanya alat-alat tubuh yang tersisa.
4. Bukti biogeografi
5. Peristiwa domestikasi.
6. Perbandingan fisiologi.
7. Embriologi perbandingan.
8. Variasi antar individu dalam satu keturunan.
9. Perbandingan genetik.
10. Petunjuk secara biokimia.
11. Bukti molekuler.

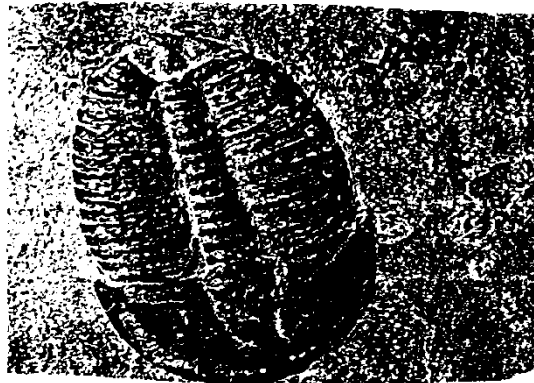
B. Beberapa Petunjuk Adanya Evolusi

1. Peninggalan Fosil di Berbagai Lapisan Bumi

Fosil merupakan makhluk hidup atau sebagian dari makhluk hidup yang tertimbun oleh tanah, pasir, lumpur dan akhirnya membatu. Kadang-kadang hanya berupa bekas-bekas organisme. Pada umumnya fosil yang telah ditemukan terdapat dalam keadaan tidak utuh, yaitu hanya merupakan suatu bagian atau beberapa bagian dari tubuh makhluk hidup. Hancurnya tubuh makhluk hidup yang telah mati disebabkan pengaruh air, angin, bakteri pembusuk, hewan-hewan pemakan bangkai dan lain-lain.

Fosil-fosil dapat ditemukan di berbagai macam lapisan bumi, sehingga penentuan umurnya didasarkan atas umur lapisan yang mengandung fosil-fosil itu. Umumnya fosil yang terdapat di lapisan yang paling dalam, mempunyai umur yang lebih tua sedangkan umur fosil yang ditemukan pada lapisan yang lebih atas mempunyai umur yang lebih muda. Dengan membandingkan fosil-fosil yang ditemukan di berbagai lapisan bumi yaitu mulai sederetan fosil-fosil yang telah ditemukan dalam lapisan batuan bumi dari yang tua sampai yang muda, dapat disimpulkan bahwa *keadaan lingkungan di masa lampau berbeda dengan sekarang*. Perubahan lingkungan tersebut terjadi secara bertahap dan diikuti dengan penyesuaian diri organisme yang ada di dalamnya, sehingga perubahan keadaan di bumi ini mengakibatkan terjadinya perubahan jenis-jenis makhluk hidup yang terjadi secara berangsur-angsur, maka dapat disimpulkan bahwa fosil merupakan petunjuk adanya evolusi.

Fosilisasi juga terjadi ketika cangkang atau tulang yang lengkap tertanam di dalam lapisan sedimen di bawah permukaan air, kemudian meninggalkan bekas bentukan atau cetakan dari organisme tersebut. Bentukan atau cetakan tersebut merupakan fosil permukaan tubuh tiruan yang baik. Salah satu contoh bentukan atau cetakan yang terbentuk menjadi fosil dapat dilihat pada (Gambar 2.1) Bentuk fosil yang lain misalnya jejak kaki atau bekas kulit yang terbentuk pada lumpur basah kemudian akhirnya mengeras menjadi batuan karang lunak.



Gambar 2.1 Fosil *Trilobite* dari Utah tengah. *Trilobite* telah punah jutaan tahun dan hanya diketahui melalui catatan fosil, tetapi jumlah spesiesnya sangat banyak sekali sebagaimana banyaknya individu yang ditemukan. Meskipun catatan fosilnya tidak lengkap, jumlah fosil *Trilobite* yang telah diidentifikasi mendekati 4.000 spesies, beberapa masih dalam tahap pertumbuhan juvenil. (Sumber : Johnson L.G, 1987 : 748)

a. Tokoh-tokoh yang mempelajari fosil

Beberapa tokoh yang telah mempelajari fosil yang berhubungan dengan evolusi adalah :

1) Leonardo da Vinci (Itali, 1452-1519)

Merupakan orang pertama yang berpendapat bahwa fosil merupakan suatu bukti adanya makhluk hidup di masa lampau.

2) George Cuvier (Perancis, 1769-1832)

Ahli anatomi perbandingan, yang mengadakan studi perbandingan antara fosil-fosil dari berbagai lapisan bumi dengan makhluk hidup yang ada sekarang. Selanjutnya menyimpulkan bahwa pada masa tertentu telah diciptakan makhluk hidup yang berbeda dari masa ke masa (atau pada masa yang berbeda diciptakan makhluk yang berbeda pula). Setiap masa diakhiri dengan kehancuran alam, paham ini dikenal dengan kataklisma.

3) Darwin

Darwin mengatakan bahwa makhluk-makhluk hidup yang terdapat pada lapisan bumi tua mengadakan perubahan bentuk menyesuaikan dengan lapisan bumi yang lebih muda. Oleh sebab itu, fosil pada lapisan lapisan bumi yang lebih muda berbeda dengan fosil di lapisan bumi yang tua.

b. Fosil Kuda (Bukti Evolusi yang Lengkap)

Evolusi pada kuda merupakan suatu contoh klasik evolusi morfologi, yang sejarahnya ditelusuri dari catatan fosilnya sejak zaman Eosin (*Eocene*) di Amerika Utara dan sedikit dari Eropa dan Asia. Fosil kuda termasuk cukup lengkap, karena kuda hidup berkelompok dalam jumlah yang cukup besar, sehingga meninggalkan sejumlah besar fosil dari zaman ke zaman.

Evolusi kuda merupakan suatu contoh klasik yang datanya cukup lengkap. Hal ini disebabkan oleh kuda hidup berkelompok dan cukup besar, sehingga meninggalkan sejumlah besar fosil dari masa ke masa. Fosil kuda primitif ditemukan dalam jumlah besar pada zaman Eosen 58 juta tahun yang lalu, yaitu di Eropa dan Amerika Utara.

Fosil kuda yang paling primitif adalah dikenal dengan *Eohippus*. Ciri-ciri *Eohippus* berdasarkan rangkanya dapat dideskripsikan sebagai berikut : kuda ini sebesar kucing/kancil dan tingginya hanya sekitar 30 cm, struktur gigi sebagai pemakan semak belukar, giginya berjumlah 22 pasang dengan gigi geraham yang terspesialisasi untuk menggiling makanan.

Dengan ukuran tubuh yang pendek sangat menguntungkan, karena dapat menyelip di antara semak belukar. Hal ini ditunjukkan pula oleh pola gigi yang sesuai untuk menggigit semak belukar dan bukan rumput. Kaki dengan beberapa jari ikut membantu dalam mengais dan menggali akar-akar yang lunak.

Pada masa berikutnya, terjadi suatu perubahan pada permukaan bumi. Hutan menjadi berkurang dan timbul padang rumput yang luas. Padang rumput merupakan biotop baru. Gigi yang sebelumnya cocok untuk merabut semak belukar, tidak diperlukan lagi. Kini diperlukan suatu gigi yang lebih lebar dan bermahkota email yang cukup tebal untuk menggigit dan mengunyah rumput. Gigi tersebut sesuai untuk mengunyah rumput karena rumput mengandung kadar silikat yang tinggi. Gigi seri melebar dan pipih untuk menggigit rumput. Gigi premolar berubah bentuk menjadi molar/geraham. Gigi geraham melebar untuk menggantikan fungsi mengunyah menjadi menggiling. Perubahan gigi mengakibatkan rahang bertambah lebar.

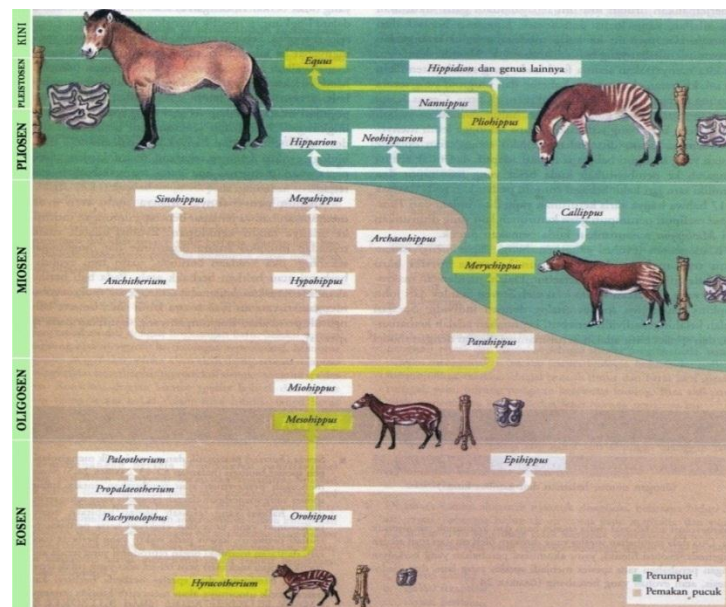
Perubahan alat gerak diperlihatkan pada bertambah panjangnya kaki, jumlah jari yang lebih sedikit, yang cocok untuk kehidupan padang rumput. Kaki depannya terdiri dari empat jari dan satu jari rudimen, sedang kaki belakangnya mempunyai tiga jari dan dua jari rudimen. Bentuk jari tengah semakin panjang dan besar dari pada moyangnya. Ujung jari setiap kaki ditutupi oleh kuku.

Dengan berkurangnya jari, postur tubuh yang lebih besar dan tengkorak memanjang yang lebih streamline, maka hewan ini dapat berlari-lari lebih mudah dan lebih cepat. Hal ini sangat diperlukan untuk menghindarkan diri dari predator. Demikian pula volume otak bertambah besar dan juga bertambah kompleks. Lebih jelasnya pada evolusi kuda terjadi perubahan sebagai berikut:

1. Pertambahan dalam ukuran. Ukuran tubuh kuda bertambah mulai dari sebesar kancil menjadi sebesar kuda aktual sekarang.
2. Pemanjangan kaki depan dan belakang. Kaki kuda yang relatif sebanding dengan tubuhnya seperti proporsi tubuh kucing atau anjing.
3. Reduksi jari-jari lateral dan pembesaran jari tengah. Mula-mula jari kaki berjumlah $\frac{3}{4}$ buah, kemudian tereduksi menjadi satu jari saja.
4. Punggung menjadi lurus dan datar. Punggung yang miring melekok dengan bagian dada lebih tinggi menjadi datar.
5. Gigi seri melebar. Gigi seri yang semula serupa gigi mamalia lainnya menjadi lebar dan pipih untuk menggigit rumput.

6. Gigi premolar berubah bentuk menjadi molar. Gigi geraham melebar semua menggantikan fungsi mengunyah menjadi menggiling.
7. Pemanjangan dari tengkorak. Tengkorak memanjang untuk memperoleh bentuk kepala yang lebih ideal untuk menambah kecepatan berlari.
8. Pertambahan mahkota gigi dengan pertumbuhan bagian email. Sesuai dengan fungsi dan jenis makanannya cara menggiling makanan mengakibatkan mahkota gigi aus. Untuk menanggulangi kerusakan gigi, maka bagian mahkota gigi cukup tebal untuk mengakomodasi keausan sampai kudanya berusia 5 tahun.
9. Volume otak bertambah besar dan juga bertambah kompleks.
10. Rahang bertambah lebar untuk mengakomodasi perubahan gigi.

Evolusi *Eohippus* sampai menjadi *Equus* diperkirakan melalui tahapan *Eohippus borealis* → *Orohippus* → *Mesohippus bairdi* → *Miohippus* → *Parahippus* → *Merychippus paniensis* → *Pliohippus* → *Equus*. (Lihat Gambar 2.2)



Gambar 2.2 Evolusi Kuda Dimulai dari 50 Juta Tahun Yang Lalu pada Era Eosen, Oligosin, Miosen, Pliosen, Pleistosen, dan Sekarang (Pratiwi, 2000)

Mengapa terjadi perubahan evolusi pada kuda dalam hal ukuran dan jumlah jari kaki? Alasan utamanya adalah karena tempat hidup kuda sangat menunjang untuk terjadinya proses evolusi yang begitu lengkap. Misalnya, kuda primitif hidup di hutan. Lingkungan yang demikian ini memungkinkan *Eohippus* yang ukurannya tubuhnya kecil dapat menyelinap di antara semak belukar. Demikian pula bentuk atau pola giginya yang sesuai untuk menggigit

semak belukar dan bukan rumput, di samping kaki dengan beberapa jari ikut membantu dalam mengais dan menggali akar-akar yang lunak.

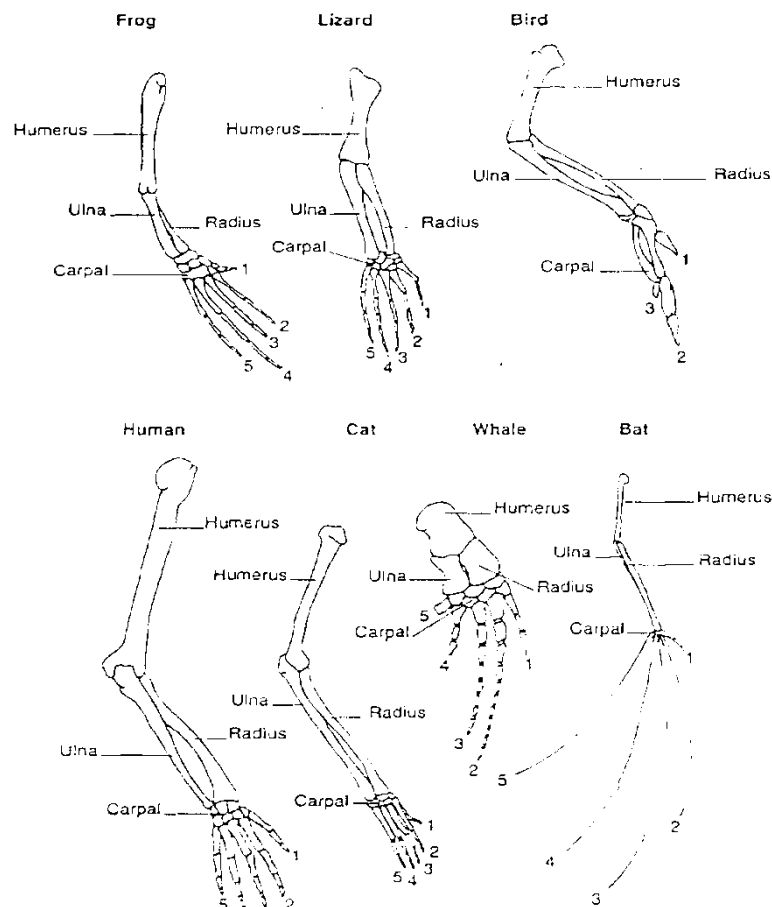
Pada masa berikutnya, terjadi suatu perubahan pada permukaan bumi. Hutan menjadi berkurang dan timbulah padang rumput yang luas. Dengan demikian, makanan yang cocok untuk kuda sebelumnya hanya mencukupi untuk menghidupi sejumlah kecil kuda, sedangkan padang rumput merupakan suatu biotop baru dengan relung yang masing kosong. Kemudian generasi kuda berikutnya ini memanfaatkan relung tersebut. Untuk dapat beradaptasi dengan baik, terjadi evolusi pada kaki yaitu menjadi lebih panjang, jumlah jari yang lebih sedikit yang cocok untuk kehidupan di padang rumput. Hal ini sangat berbeda dengan keadaan di lantai hutan yang penuh tertutupi oleh akar dan ranting. Dengan berkurangnya jari, postur tubuh dan tengkorak menjadi lebih ideal sehingga mereka dapat berlari-lari dengan lebih mudah dan lebih cepat. Bentuk tubuh seperti ini memungkinkan mereka dapat menghindari diri dari predator secara lebih efektif.

Demikian pula ukuran tubuh yang lebih besar secara tidak langsung menolong mereka dari pemangsa (predator) yang berukuran tubuh lebih kecil. Jika ukuran tubuh kuda tetap sebesar kancil atau anjing, maka predator dengan mudah dapat memangsa mereka yang berjumlah sangat banyak dan hidupnya berkelompok-kelompok. Gigi yang sebelumnya cocok untuk merebut semak belukar, tidak diperlukan lagi. Sebaliknya, kini diperlukan suatu gigi yang lebih lebar dan mahkota emailnya cukup tebal untuk menggigit dan mengunyah rumput. Gigi tersebut sesuai untuk mengunyah rumput karena mengandung kadar silikat yang tinggi.

2. Anatomi Perbandingan

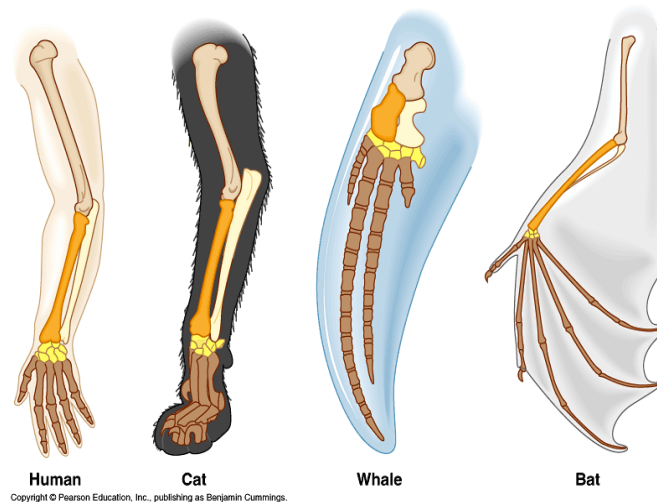
Pendekatan untuk menginterpretasi bukti-bukti paleontologi adalah **anatomi perbandingan**. Para ahli anatomi perbandingan mencoba menemukan persamaan-persamaan dan perbedaan-perbedaan antara struktur dasar (*fundamental structure*) organisme hidup. Mereka mempelajari bentuk-bentuk struktur dasar setiap kelompok organisme. Sebagai contoh, semua hewan vertebrata memiliki struktur dasar yang sama, yakni: suatu kerangka utama penyanggah tengkorak dan tulang belakang; tulang rusuk yang melindungi jantung dan paru-paru, tertancap pada tulang belakang; sepasang organ tambahan; dan sistem peredaran darah, pernafasan atau respirasi, pencernaan, pengeluaran yang sama.

Para ahli anatomi membandingkan ciri-ciri anatomi hewan masa kini, tetapi studi perbandingan anatomi kerangka lebih penting bagi para paleontologi karena bukti-bukti fosil anatomi yang tersusun hampir semua adalah metrial rangka.



Gambar 2.3 Struktur Homologi pada beberapa vertebrata. Semua tetrapod moderen mempunyai pentadactyl dasar (lima digit) struktur lengannya. Misalnya, *forelimb* pada burung, manusia, ikan paus, dan kelelawar, semuanya mempunyai struktur dasar yang sama, tetapi mempunyai fungsi yang berbeda. (Sumber: Ridley, 1996 : 54).

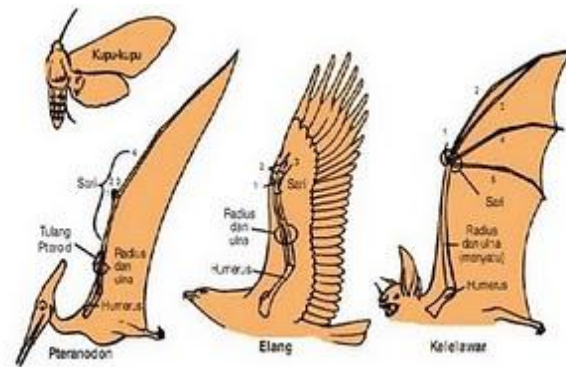
Kesamaan dasar dalam struktur yang diturunkan dari nenek moyang yang umum disebut struktur *homolog*. Lebih jelasnya, homologi adalah struktur dasar sama yang diturunkan secara genetik dari nenek moyang yang umum tetapi kemudian memiliki fungsi yang berbeda. Suatu contoh homologi yang baik adalah tulang lengan depan vertebrata (Gambar 2.6). Semua vertebrata seperti burung, ikan paus, dan manusia mempunyai struktur dasar tulang lengan depan yang sama kemudian melewati proses perubahan (evolusi) dari nenek moyang yang umum, kemudian menampilkan fungsi yang berbeda. Kesamaan anggota gerak tidak hanya meliputi tulang, tetapi juga otot, saraf, persendian dan pembuluh darah. Semua kesamaan menunjukkan bahwa organ tersebut berasal dari struktur yang sama, dan selanjutnya berubah struktur sehingga fungsinya berbeda. Peristiwa ini dikenal dengan nama *homologi* (Lihat Gambar 2.4).



Gambar 2. 4 Homologi ekstremitas anterior beberapa binatang vertebrata (sumber: Arms dan Camp,1995)

Konsep lain dari anatomi perbandingan yaitu *analogi*. Analogi adalah menunjukkan fungsi yang sama, tetapi mempunyai struktur dasar yang berbeda. Misalnya sayap burung dengan sayap serangga mempunyai fungsi yang sama tetapi struktur dasarnya berbeda. Burung mempunyai kerangka tulang sayap sedangkan serangga mempunyai sayap yang tersusun dari lapisan kitin yang keras, tetapi keduanya berfungsi untuk terbang (Gambar 2.6). Anggota gerak depan cecak dan kadal untuk berjalan, sayap burung dan sayap kelelawar untuk terbang, keseluruhan anggota gerak tersebut homolog dengan kaki depan kuda atau tangan manusia. Sayap burung dan sayap kelelawar berbeda dengan sayap serangga maupun sayap kupu-kupu, meskipun fungsinya sama. Hal ini disebabkan karena asal usul organ atau bentuk dasarnya berbeda tetapi berkembang sehingga mempunyai fungsi yang sama. Lihat Gambar 2.5)

Anatomi perbandingan yang juga diidentifikasi yakni *struktur vestigial*. Struktur vestigial adalah struktur-struktur tertentu yang tidak berkembang terus pada beberapa organisme, tetapi dalam perkembangan selanjutnya berfungsi lain. Struktur vestigial termasuk rudimentasi, sayap pada mutan vestigial (*Drosophila melanogaster*) kekurangan penglihatan pada hewan-hewan penghuni gua, gigi geraham manusia, tulang ekor pada manusia (pada mamalia yang lain ekornya tumbuh memanjang).

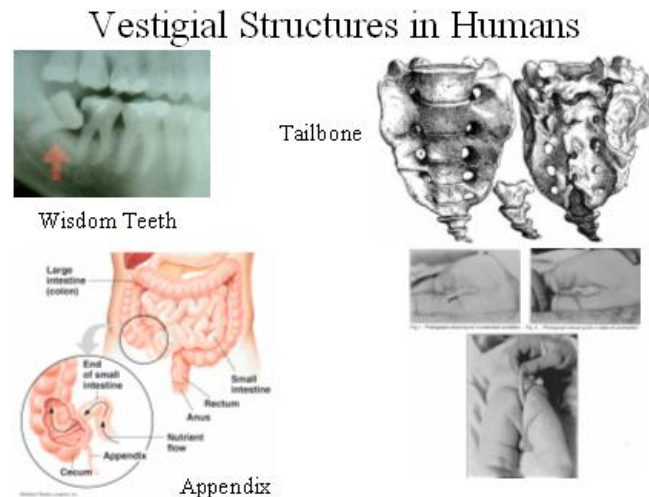


Gambar 2.5 Analogi Anggota Tubuh Depan Serangga dan Vertebrata (sumber:Arms dan Camp,1995)

3. Organ yang Mengalami Rudimentasi/Organ Tubuh yang Tersisa

Rudimentasi organ merupakan petunjuk adanya evolusi. Organ yang berguna pada suatu makhluk hidup, pada makhluk hidup lain mungkin kurang berfungsi. Contoh tulang ekor pada manusia kurang berfungsi sehingga mengalami rudimenter. Karena akan membuang waktu saja untuk terus-menerus menyediakan darah, zat makanan, dan ruangan bagi organ yang tidak lagi memiliki fungsi penting, maka seleksi alam cenderung menguntungkan individu yang memiliki organ dalam bentuk tereduksi, dan dengan demikian cenderung akan menghilangkan struktur yang tidak berfungsi lagi. Namun pada kelompok mamalia lain, ekor sangat berkembang dan berfungsi sebagai ekor, begitu juga pada kelompok Vertebrata lainnya.

Alat-alat sisa digunakan sebagai petunjuk adanya evolusi, karena dalam kenyataannya meskipun alat tersebut tidak lagi menunjukkan suatu fungsi nyata tapi tetap dijumpai secara nyata dan jumlahnya boleh dikatakan cukup banyak. Penganut paham evolusi melihat adanya kelemahan dari penganut paham ciptaan khusus, bertolak dari alat-alat tersisa yang tidak lagi ada gunanya itu. Adapun organ-organ sisa antara lain: apendiks, selaput mata sebelah dalam, otot-otot penggerak telinga, tulang ekor, gigi taring yang runcing, geraham ketiga, rambut didada, mammae pada laki-laki, musculus pyramidalis dan masih banyak lagi (Gambar 2.8). Sisa-sisa organ tubuh pada hewan yang masih ditemukan antara lain sisa kaki belakang pada ular piton yang mirip benjolan kuku, dan sisa bangunan sayap pada burung kiwi.



Gambar 2.6 Beberapa Struktur Sisa dari Manusia (sumber: Triastutik, 2008)

4. Bukti Biogeografi

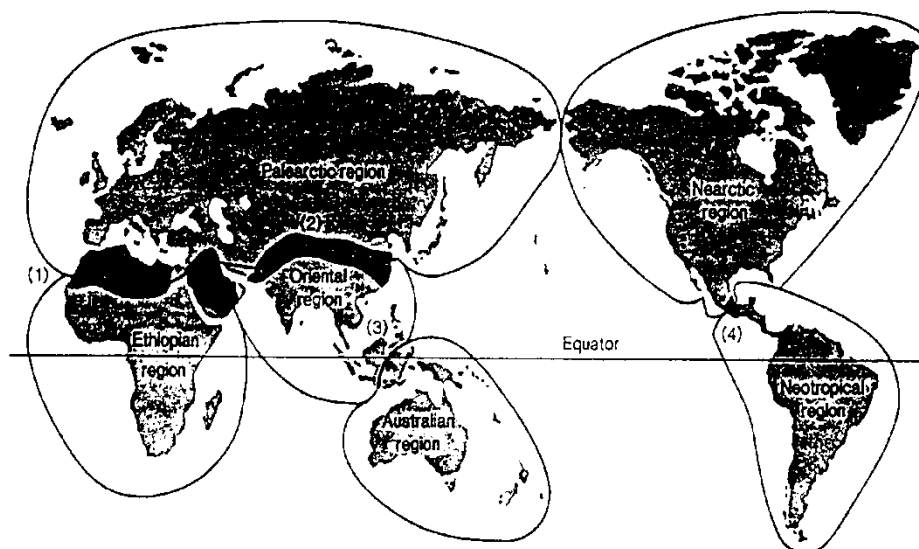
Biogeografi adalah mempelajari distribusi geografi dari tanaman dan hewan. Dengan mempelajari biogeografi kita dapat menjelaskan mengapa spesies-spesies berdistribusi, dan apa bentuk distribusi yang diperlihatkan mengenai habitat dan daerah asal mula mereka. Dari perjalanan Darwin mengelilingi dunia dengan H.M.S. *Beagle*, ia menemukan bahwa spesies tanaman dan hewan umumnya tidak berdistribusi jauh dari habitat yang potensial. Studi-studi mengenai biogeografi sejak Darwin dibuktikan berulang-ulang oleh para ilmuwan.

Kesimpulan mendasar dari studi biogeografis memperlihatkan bahwa suatu spesies baru muncul pada satu tempat dan kemudian menyebar menuju keluar dari titik atau tempat asal. Beberapa spesies kemudian menjadi lebih luas distribusinya, tetapi mereka tidak dapat melewati barrier-barrier alami yang terpisah daerah biogeografis yang besar. Oleh karena itu, meskipun lingkungan hidup sesungguhnya identik pada daerah biogeografis berbeda, jarang ditempati oleh spesies yang sama. Buktinya, setiap daerah geografi besar di dunia (lihat gambar 2.9) mempunyai karakteristik kelompok tanaman dan hewan. Sebagai contoh, di Australia semacam kanguru (*marsupial*) mempunyai kantong yang berperan sebagai tempat menyusui dan melindungi anaknya, pada daerah biogeografi yang lain kanguru (*marsupial*) hampir tidak ditemukan. Selanjutnya, catatan fosil setiap daerah menampilkan suatu garis evolusioner kejadian-kejadian biologis yang terpisah dari semua daerah-daerah lain. Dengan setiap garis evolusioner, banyak fosil-fosil yang telah ditemukan dapat dibentuk atau disusun suatu spesies yang pernah hidup pada daerah tertentu.

Bukti-bukti observasi atau pengamatan memperkuat konsep bahwa seleksi alam berlaku, oleh kekuatan besar dari lingkungan sehingga muncul spesies baru yang hanya dapat hidup beradaptasi atau dapat menyesuaikan diri dengan kondisi topografinya maupun kondisi

iklim disekelilingnya. Sebagai buktinya, apa yang dilihat Darwin ketika menemukan bahwa spesies pada pulau tertentu terhalang untuk berhubungan dengan spesies pada pulau-pulau dekat, dan bahwa spesies sepulau umumnya berhubungan dengan spesies terdekat yang hidup sedaratan. Sebaliknya, tidak ada bukti yang mendukung keberadaan sekelompok “*island species*” (spesies yang hanya ada pada pulau tertentu) dengan karakteristik tertentu ditemukan dalam habitat-habitat pulau lain kemanapun kita mengelilingi dunia.

Pada tingkatan yang lebih spesifik, biogeografi menunjukkan banyak bukti-bukti menyolok yang mengarah pada kejadian evolusi konvergen (*convergent evolution*). Organisme-organisme pada kenyataannya mempunyai biogeografi berbeda-beda, meskipun diturunkan dari keturunan nenek moyang yang sangat berbeda, memiliki kesamaan proses adaptasi pada habitat-habitat khusus. Sebagai contoh, tanaman kaktus (famili *Cactaceae*) ditemukan di gurun pasir sebelah tenggara Amerika Utara, dan di gunung pasir Andes, tetapi tidak ada dimanapun di tempat lain. Di samping itu habitat-habitat kering dan tandus di Afrika ditempati oleh sekelompok tanaman dari famili *Euphorbiaceae*. Contoh-contoh ini memperjelas teori kekuatan seleksi alam dimana terbentuk ciri-ciri atau bentuk-bentuk yang sangat sama oleh karena adaptasi pada lingkungan yang sama (lihat Gambar 2.9)



Gambar 2.7 Daerah-daerah biogeografi besar (mayor) di dunia. Daerah biogeografi berbeda umumnya menunjukkan tanaman dan hewan berbeda. Warna hitam pekat menunjukkan beberapa barrier alami (gurun pasir, gunung tinggi, dll) memisahkan setiap daerah. Barrier-barrier tersebut antara lain: (1) Gurun pasir Arabia dan Sahara; (2) Pegunungan yang sangat tinggi, termasuk gunung Himalaya dan gunung Nan Ling; (3) Laut dalam diantara pulau-pulau di Malay Archipelago (diperkenalkan oleh A.R. Wallace dan menulis mengenai barrier ini; dan lebih dikenal dengan sebutan garis Wallace); (4) Transisi di antara dataran tinggi di sebelah selatan Mexico dan dataran tropis di Amerika Tengah. (Sumber : Johnson L.G, 1987 : 745)

Lebih jauh dijelaskan, dua tempat yang memiliki iklim yang sama belum tentu keadaan flora dan faunanya sama, bahkan mungkin berbeda sama sekali. Sebagai contoh kepulauan Galapagos dan kepulauan Cape Verde mempunyai iklim yang sama tetapi flora dan faunanya berbeda. Flora dan fauna di kepulauan Galapagos hampir sama dengan flora dan fauna yang terdapat di Amerika Selatan.

Dihasilkannya 13 spesies burung Finch di kepulauan Galapagos disebabkan oleh adanya penyebaran geografi. Burung yang berasal dari Amerika Selatan yang bermigrasi ke kepulauan Galapagos ini menemukan lingkungan baru yang berbeda dengan lingkungan asalnya sehingga terbentuk varian-varian yang sesuai dengan lingkungan yang baru dan terus berkembang.

Cara penyebaran ini ada 2 macam yaitu penyebaran aktif dan penyebaran pasif. Penyebaran aktif ialah penyebaran yang didorong oleh factor-faktor dari dalam diri individu itu sendiri, misalnya perpindahan populasi burung dari suatu tempat ke tempat lain untuk mencari makanan; sedangkan penyebaran pasif ialah penyebaran yang disebabkan oleh factor-faktor lain, misalnya penyebaran buah kelapa oleh air. Dalam melakukan penyebaran itu banyak rintangan yang tidak dapat diterobos atau dilalui. Jika dapat diterobos lingkungan yang baru itu tidak memenuhi persyaratan bagi hidupnya, oleh karena itu baik penyebaran aktif maupun penyebaran pasif tidak selalu berakibat perluasan daerah.

5. Peristiwa Domestikasi

Domestikasi adalah usaha manusia untuk menjadikan hewan/tanaman liar menjadi tanaman/hewan yang dapat dikuasai dan bermanfaat bagi manusia. Pada dasarnya tindakan ini adalah memindahkan makhluk hidup dari lingkungan aslinya ke lingkungan yang diciptakan oleh manusia. Tindakan ini dapat mengakibatkan timbulnya jenis-jenis hewan dan tumbuhan yang menyimpang dari aslinya, yang mengarah terbentuknya spesies baru.

Peristiwa persilangan dari dua varietas tanaman/hewan sejenis juga dapat menyebabkan terbentuknya variasi baru yang berbeda dari induknya yang dapat menyebabkan terjadinya spesies baru. Hasil perjalanan Darwin menunjukkan bahwa spesiasi dapat terjadi karena upaya domestifikasi oleh manusia, misalnya upaya pemuliaan tanaman maupun hewan.

6. Variasi Antar Individu Dalam Satu Keturunan.

Fenotip suatu organisme ditentukan oleh faktor genetika dan lingkungan. Fenotip yang muncul merupakan variasi dari organisme tersebut. Jadi variasi individu terbentuk

karena adanya variasi genetik dan perbedaan kondisi lingkungan. Contoh kita dapat memperhatikan keturunan dalam satu keluarga, setiap orang memiliki keunikan tersendiri meskipun mempunyai orang tua/ leluhur yang sama. Antara kakak dan adik, bahkan anak kembar sekalipun tidak ada yang sama persis, padahal ayah dan ibunya sama. Seperti terlihat pada gambar 2.10 di bawah ini!

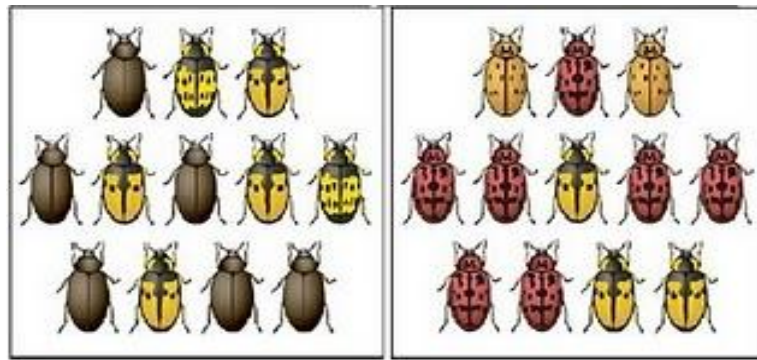


Gambar 2.8 keanekaragaman dalam satu keturunan (sumber:edukasi.net)

Pada tanaman dan hewan terdapat persamaan sifat/ciri tubuh atau yang disebut *keseragaman* sifat . Dalam keseragaman sifat, ternyata masih terdapat perbedaan atau *keberagaman* sifat, misalnya warna, bentuk, berat, dan ukuran. Jadi, keanekaragaman hayati terbentuk karena adanya keseragaman dan keberagaman sifat atau ciri makhluk hidup. Di dalam satu jenis (spesies) makhluk hidup juga dijumpai adanya perbedaan atau keberagaman. Perbedaan sifat dalam satu spesies disebut *variasi* (Raven *et al.* 2004). Beberapa jenis hewan dan tanaman yang ada di sekitar kita memberikan gambaran tentang adanya keanekaragaman hayati atau disebut *biodiversity*.

Keanekaragaman hayati terbagi menjadi 3 tingkat, yaitu keanekaragaman gen, keanekaragaman jenis, dan keanekaragaman ekosistem. Keanekaragaman gen menyebabkan variasi antar individu sejenis, misalnya variasi genetik pada variasi genetik pada kelompok bunga mawar atau kelompok kumbang (Lihat Gambar 2.11). Hal ini dapat terjadi karena pengaruh berbagai faktor seperti suhu, tanah, makanan, dan lain-lain. Variasi-variasi di dalam satu spesies ini dalam perkembangan berikutnya akan menurunkan keturunan yang berbeda. Bila variasi di dalam spesies itu menghuni daerah yang berbeda, maka dalam perkembangannya akan menghasilkan varian yang berbeda.

Proses seleksi terhadap berbagai jenis hewan dan tumbuh-tumbuhan selama bertahun-tahun akan menghasilkan varian yang makin jauh berbeda dengan moyangnya yang secara berangsur-angsur akan menghasilkan spesies baru yang berbeda dari induknya. Jadi dapat disimpulkan bahwa adanya variasi merupakan petunjuk adanya evolusi yang menuju ke arah terbentuknya spesies-spesies baru.



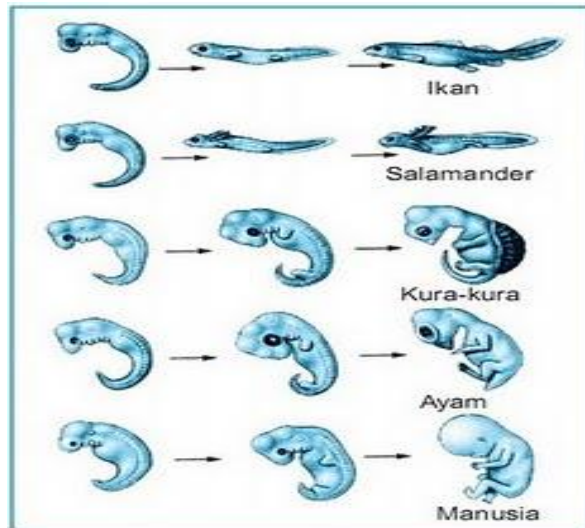
Gambar 2.9 Variasi Genetik pada Kelompok Kumbang (sumber: Anonim, 2006)

7. Embriologi Perbandingan

Semua anggota Vertebrata dalam perkembangan embrionya menunjukkan adanya persamaan. Persamaan perkembangan embrio dimulai dari tahap berikut ini : peleburan sperma dengan ovum → zigot → pembelahan (cleavage) → morulla → blastula → gastrula → tahap awal perkembangan embrio.

Mengenai perkembangan embrio Karl von Baer, menyatakan bahwa: (a) sifat-sifat umum muncul paling awal kemudian diikuti sifat-sifat khusus; (b) perkembangan dimulai dari yang umum sekali, kemudian kurang umum, dan akhirnya ke sifat-sifat yang khusus; (c) hewan yang satu memisah secara progresif dari hewan yang lain; (d) dalam perkembangannya hewan-hewan multiseluler bentuk embrionya sama, tetapi kemudian pada saat dewasa bentuknya menjadi berbeda-beda. Gambar 2.10 berikut ini, menunjukkan perkembangan yang dinyatakan oleh Karl von Baer tersebut, walaupun gambar ini tidak dimulai dari tahap blastula dan gastrula.

Adanya persamaan perkembangan pada semua golongan Vertebrata, tersebut menunjukkan adanya hubungan kekerabatan. Perkembangan individu mulai dari sel telur dibuahi hingga individu itu mati disebut *Ontogeni*. Kalau kita bandingkan dengan *filogeni*, yaitu sejarah perkembangan organisme dari filum yang paling sederhana hingga yang paling sempurna, maka akan kita lihat adanya kesesuaian. Sehingga kita dapat mengatakan bahwa ontogeni merupakan filogeni yang dipersingkat. Dengan kata lain, ontogeni merupakan ulangan (*rekapitulasi*) dari filogeni.



Gambar 2.10 Perkembangan Embrio Berbagai Jenis Vertebrata(sumber: Anonim, 2006)

8. Perbandingan Fisiologi

Makhluk hidup mulai dari yang derajat terendah hingga ke derajat yang paling tinggi tubuhnya tersusun atas sel. Walaupun jumlah sel dan morfologi setelah dewasa berbeda-beda, namun kegiatan fisiologis di dalam setiap selnya memiliki kemiripan, seperti :

- a. dalam metabolisme,
- b. dalam respirasi,
- c. dalam sintesa protein,
- d. sintesa ATP dan penggunaannya dalam aktivitas hidup

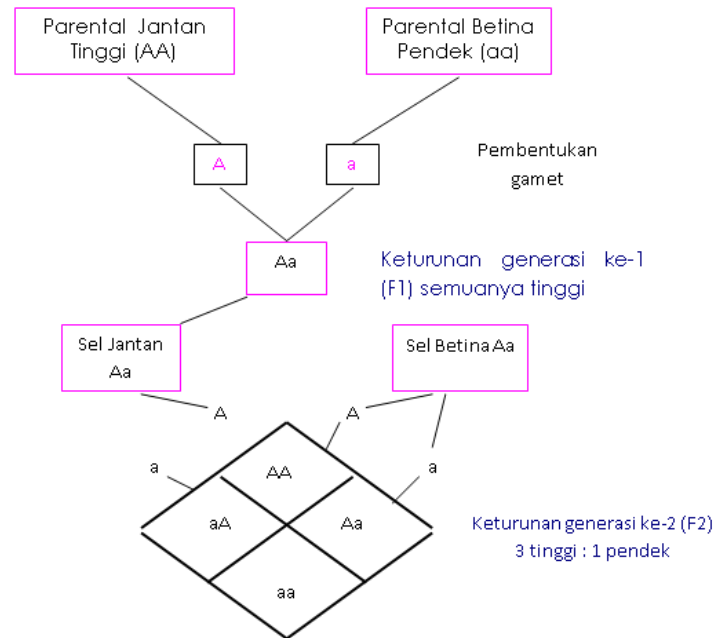
9. Perbandingan Genetika

Teori ini dipelopori oleh George Mendel. Ia mengemukakan teori genetika yang menyangkut adanya sejumlah sifat yang dikode oleh satu macam gen. Dengan demikian banyaknya variasi alel menentukan kemampuan terhadap ketahanan untuk dapat terus hidup. Hanya saja pada zaman George Mendel, teori genetika belum dipahami dan belum diperkirakan dapat dimanfaatkan untuk menerangkan teori yang lain. Teori genetika mengalami stagnasi hampir selama 35 tahun sejak dikemukakan, dan baru disadari kegunaannya di awal abad ke-20.

a. Hukum Pertama Mendel

Berdasarkan eksperimen persilangan yang dilakukan Mendel dengan menggunakan satu sifat beda (ingat pelajaran Genetika Dasar mengenai persilangan Monohibrida) dari tanaman kacang ercis (*Pisum sativum*), Mendel menarik beberapa kesimpulan. Kesimpulan pertama yang dinyatakan oleh Mendel bahwa, setiap ciri dikendalikan oleh dua macam informasi (faktor tertentu) dari parental. Satu informasi (faktor) berasal dari sel jantan dan satu informasi (faktor) yang lain berasal dari sel betina. Kedua informasi (faktor) ini yang

sekarang dikenal dengan istilah gen (pembawa sifat keturunan). Mendel mengungkapkan bahwa kedua informasi (faktor) ini akan berpisah pada saat pembentukan gamet dan kemudian akan menentukan ciri-ciri atau sifat yang akan nampak pada keturunan. Sekarang konsep ini yang dikenal dengan Hukum Mendel Pertama – Hukum Segregasi.



Gambar 2.11 Diagram Persilangan Monohibrida (sumber: Yusuf, F., 2006)

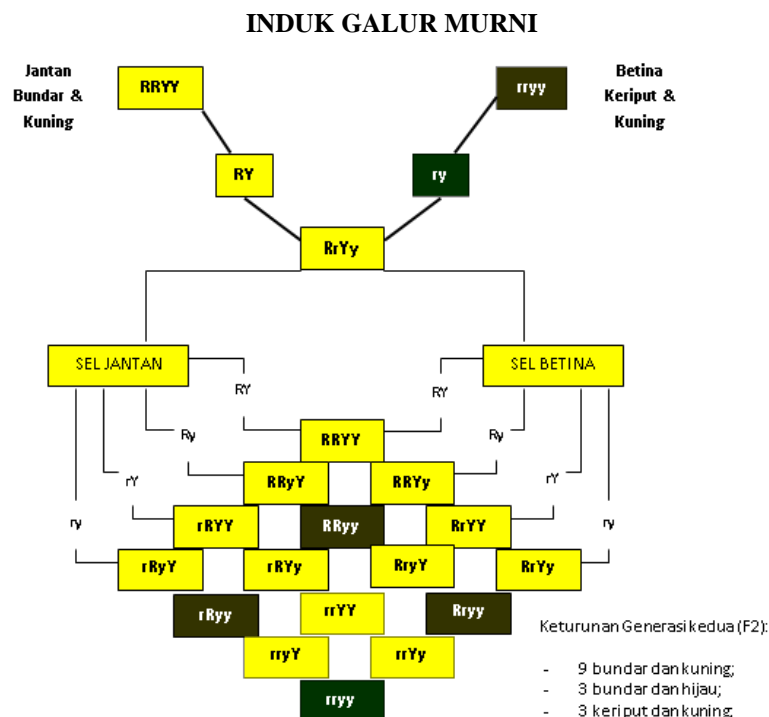
Dari setiap ciri dalam kacang ercis yang diteliti oleh Mendel, terdapat satu ciri yang dominan sedangkan yang lainnya terpendam (resesif). Induk “galur murni” dengan ciri dominan mempunyai sepasang gen dominan (AA) yang pada saat pembentukan gamet hanya akan memberikan satu gen dominan (A). Induk “galur murni” dengan ciri terpendam mempunyai sepasang gen resesif (aa) yang pada saat pembentukan gamet hanya akan memberikan satu gen resesif (a). Dengan demikian keturunan pada generasi pertama menerima satu gen dominan dan satu gen resesif (Aa) yang menunjukkan ciri gen dominan. Bila keturunan ini berbiak sendiri menghasilkan keturunan generasi kedua, dimana sel-sel (induk jantan) dan sel-sel (induk betina) masing-masing mengandung satu gen dominan (A) dan satu gen resesif (a). Oleh karena itu, ada empat kombinasi yang mungkin terjadi yaitu: AA, Aa, Aa, dan aa. Tiga kombinasi yang pertama menghasilkan keturunan dengan ciri dominan, sedangkan kombinasi terakhir menghasilkan keturunan dengan ciri resesif (Gambar 2.13).

b. Hukum Kedua Mendel

Mendel kemudian melakukan penyelidikan terhadap kacang ercis (*Pisum sativum*) dengan dua ciri atau tanda beda sekaligus, yakni bentuk benih (bundar atau keriput) dan warna benih (kuning atau hijau). Mendel melakukan persilangan antara tumbuhan yang selalu

menunjukkan ciri-ciri dominan (bentuk bundar dan warna kuning) dengan tumbuhan berciri terpendam (bentuk keriput dan warna hijau). Sekali lagi, ciri terpendam (resesif) tidak muncul pada keturunan generasi pertama. Jadi, semua tumbuhan generasi pertama mempunyai ciri kuning bundar. Namun, tumbuhan generasi kedua mempunyai empat macam ciri benih yang berbeda yakni, bundar dan kuning, bundar dan hijau, keriput dan kuning, serta keriput dan hijau. Keempat macam ciri ini terbagi dalam perbandingan kira-kira 9 : 3 : 3 : 1 (lihat Gambar 2.14). Mendel mengecek hasil ini dengan kombinasi dua ciri lain. Ternyata perbandingan yang sama muncul lagi.

Perbandingan 9 : 3 : 3 : 1 menunjukkan bahwa kedua ciri dari masing-masing induk tidak saling tergantung, namun dapat berpadu bebas. Hasil ini disebut Hukum kedua Mendel (Hukum *Independent assortment*- berpadu bebas). Eksperimen Mendel menunjukkan bahwa ketika tanaman induk membentuk sel-sel gamet jantan dan betina, semua kombinasi bahan genetik dalam keturunannya, dan selalu dalam proporsi yang sama dalam setiap generasi. Informasi genetik selalu ada meskipun ciri tertentu tidak tampak di dalam beberapa generasi karena didominasi oleh gen yang lebih kuat. Dalam generasi berikut, bila ciri dominan tidak ada, maka ciri terpendam (resesif) akan muncul lagi.

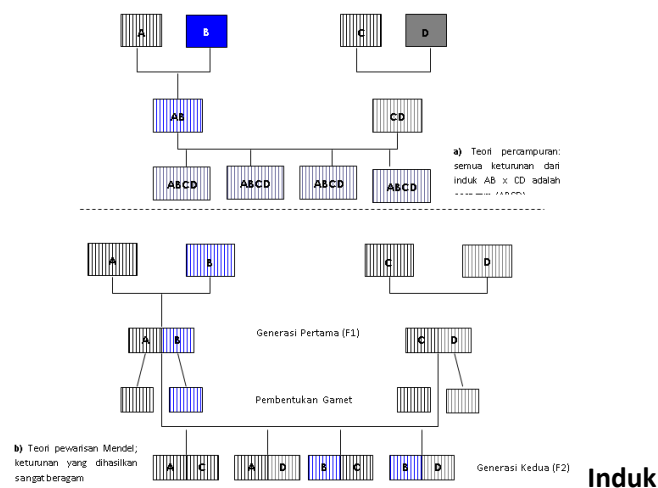


Gambar 2.12 Diagram persilangan dihibrida yang dapat menjelaskan hukum kedua Mendel (Hukum Independent Assortment). Huruf kapital menunjukkan ciri dominan, huruf non-kapital menunjukkan ciri resesif. (sumber:Yusuf, F., 2006)

c. Pentingnya Karya Mendel dalam Evolusi

Temuan Mendel mempunyai implikasi penting. Karyanya membantah adanya teori percampuran dalam keturunan (*The Blending Theory of Inheritance*) yaitu, pemikiran bahwa ciri-ciri orang tua diwariskan kepada anak dan kemudian bercampur, lalu diwariskan ke generasi berikut dalam bentuk campuran. Di kalangan manusia, ungkapan yang menyatakan seseorang berdarah campuran, sebenarnya berawal pada teori ini.

Eksperimen Mendel membuktikan justru kebalikannya yang benar; yakni faktor genetik ciri atau sifat yang diwarisi dari orang tua hanya bergabung untuk sementara waktu dalam diri anak, dan dalam generasi berikutnya faktor genetik tersebut akan pecah atau memisah lagi menjadi satuan-satuan yang ada pada induk aslinya. Perbandingan antara teori atau hukum Mendel dengan teori percampuran sifat diperlihatkan pada (Gambar 2.15a dan 2.15b). Diagram tersebut menunjukkan bahwa teori percampuran ternyata menghasilkan keseragaman (Gambar 15.a), sedangkan eksperimen Mendel menunjukkan hasil keturunan yang beragam (Gambar 15.b). Berdasarkan kedua teori tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa teori pewarisan menurut Mendel memberi peluang kejadian evolusi biologi makhluk hidup.



Gambar 2.13 a) Teori percampuran: semua keturunan dari induk AB x CD adalah seragam (ABCD) ;
b) Teori pewarisan Mendel; keturunan yang dihasilkan beragam. (sumber:Yusuf, F., 2006)

d. Petunjuk Secara Biokimia

Kekerabatan antara berbagai jenis makhluk hidup dapat diuji secara biokimia. Salah satu percobaan biokimia yang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kekerabatan berbagai organisme adalah *uji presipitin* oleh Natael. Dasar percobaan ini adalah adanya

presipitin atau endapan pada suatu reaksi *antigen-antibodi*. Banyak sedikitnya endapan yang terbentuk dapat digunakan untuk menentukan jauh dekatnya kekerabatan antara suatu organisme yang satu dengan organisme yang lainnya.

Percobaan tersebut adalah sebagai berikut : kelinci disuntik dengan serum manusia berulang kali. Selang beberapa waktu kemudian, serum kelinci diambil dan dianalisis. Ternyata telah mengandung zat anti ini terbentuk karena adanya antigen yang masuk, yaitu serum darah manusia.

Serum kelinci yang telah mengandung zat anti disuntikkan ke dalam berbagai jenis makhluk hidup, berturut-turut manusia, gorila, orang hutan, babon, kucing, anjing, banteng, dan lain-lain. Selang beberapa waktu, darah manusia dan hewan-hewan yang disuntik dengan serum kelinci dianalisis ternyata mengandung presipitin yang berbeda-beda kadarnya. Banyaknya endapan ditentukan oleh jauh dekatnya kerabat antara kelinci dengan makhluk-makhluk tersebut. Makin jauh kekerabatannya makin banyak presipitannya. Lihat Tabel 2.1

Tabel 2.1 Data Kecenderungan Biokimia Mengenai Evolusi

Asal Serum	Organisme	Jumlah Presipitasi Reaksi Terhadap Manusia
Primata	Manusia	100
	Gorila	64
	Orang hutan	42
	Babon	29
Karnivora	Kucing	3
	Anjing	3
Ungulata	Banteng	10
	Kambing	7
	Kuda	2
	Babi hutan	0
Rodentia	Marmut	0
	Kelinci	0

(sumber: Yusuf, F., 2006)

e. Bukti Molekuler

Evolusi molekuler merupakan merupakan proses evolusi yang terjadi pada skala DNA, RNA, dan protein. Secara garis besar, evolusi molekuler ini membahas mengenai RNA, DNA, analisis filogenik, dan evolusi eukariot. Evolusi molekuler muncul sebagai bidang ilmu pengetahuan pada tahun 1960-an ketika peneliti dari bidang biologi molekuler, biologi evolusi, dan genetika populasi berusaha memahami struktur dan fungsi asam nukleat dan protein yang baru ditemukan. Evolusi molekuler pada dasarnya menjelaskan dinamika perubahan evolusi pada tingkat molekuler, bahasan pada evolusi molekuler itu meliputi perubahan materi genetik (urutan DNA atau RNA) dan produknya serta rata-rata dan pola

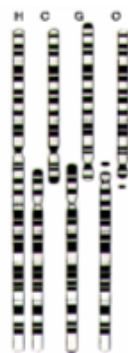
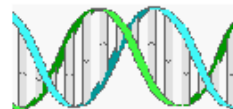
perubahannya serta mengkaji pula sejarah evolusi organisme dan makromolekul yang didukung data-data molekuler (filogeni molekuler)

Di samping kesamaan yang ditemukan pada struktur-struktur anatomi, para ahli biokimia juga menemukan banyak kesamaan pada tingkatan molekuler. Kenyataannya semua organisme hidup memiliki materi genetik (DNA) yang hampir sama, menggunakan kode-kode genetik yang sama, dan memiliki molekul berenergi tinggi (ATP). Sebagai materi genetik, DNA berfungsi mulai dari perkembangan awal setiap organisme. Sejak diketahui bahwa transfer sifat-sifat keturunan dan kontrol genetik melalui DNA, memberi kemajuan yang efektif dan efisien, dan terjadi perubahan dimana seleksi alam tidak banyak lagi disukai, tetapi beralih ke mekanisme hereditas.

Semua organisme hidup tersusun oleh kode genetik (DNA=Dioksisiribonukleotid Acid) yang sama. Kode genetik makhluk hidup tersusun oleh gula ribosa, pospat, dan empat basa nitrogen yang saling berkombinasi menghasilkan sifat-sifat fenotif yang berbeda. Kode genetik ini bersifat universal. Melalui proses transkripsi dan tranlasi kode-kode genetik ini diterjemahkan menjadi asam amino-asam amino yang menyusun protein. Secara universal protein seluruh makhluk hidup tersusun oleh kombinasi 20 asam amino (Gambar 2.14 dan 2.15).

Genetic Homologies

All living organisms share the same genetic code



Chromosome and gene similarities between species match evolutionary similarities

This is true for both coding regions and "junk DNA"

Gambar 2.14 Homologi Kode Genetik (sumber: Anonim, 2006)

First base	Second base						Third base
	U	C	A	G	U	C	
U	UUU	Phenylalanine	F	UCU	Serine	S	U
	UUC	Phenylalanine	F	UCC	Serine	S	C
	UUA	Leucine	L	UCA	Serine	S	A
	UUG	Leucine	L	UCG	Serine	S	G
C	CUU	Leucine	L	CCU	Proline	P	U
	CUC	Leucine	L	CCC	Proline	P	C
	CUA	Leucine	L	CCA	Proline	P	A
	CUG	Leucine	L	CCG	Proline	P	G
A	AUU	Isoleucine	I	AUU	Threonine	T	U
	AUC	Isoleucine	I	AUC	Threonine	T	C
	AUA	Isoleucine	I	AUA	Threonine	T	A
	AUG	Start Methionine	M	AUG	Threonine	T	G
G	GUU	Valine	V	GUU	Alanine	A	U
	GUC	Valine	V	GUC	Alanine	A	C
	GUA	Valine	V	GUA	Alanine	A	A
	GUG	Valine	V	GUG	Alanine	A	G
U	UAU	Tyrosine	Y	UAU	Cysteine	C	U
	UAC	Tyrosine	Y	UAC	Cysteine	C	C
	UAA	Stop		UAA	Stop		A
	UAG	Stop		UAG	Tryptophan	W	G
C	CAU	Histidine	H	CAU	Arginine	R	U
	CAC	Histidine	H	CAC	Arginine	R	C
	CAA	Glutamine	Q	CAA	Arginine	R	A
	CAG	Glutamine	Q	CAG	Arginine	R	G
A	AUU	Asparagine	N	AUU	Serine	S	U
	AAC	Asparagine	N	AAC	Serine	S	C
	AAA	Lysine	K	AAA	Arginine	R	A
	AAG	Lysine	K	AAG	Arginine	R	G
G	GAU	Aspartic Acid	D	GAU	Glycine	G	U
	GAC	Aspartic Acid	D	GAC	Glycine	G	C
	GAA	Glutamic Acid	E	GAA	Glycine	G	A
	GAG	Glutamic Acid	E	GAG	Glycine	G	G

RNA Codes
Amino acid Abbreviation
Copyright © 2004 Pearson Prentice Hall, Inc.

Gambar 2.15 Kamus Kode Genetik (sumber:Pratiwi, 2001)

Kesamaan struktur protein menjadi perhatian khusus para ilmuwan dalam mempelajari evolusi. Para ahli biokimiawi menemukan urutan asam amino dari molekul protein. Dari informasi ini, gen-gen dapat disusun karena diketahui bahwa asam amino dalam protein, berhubungan dengan nukleotida-nukleotida yang terdapat dalam molekul DNA. Hal ini memungkinkan studi genetik dilakukan untuk mengkaji proses evolusi. Penelitian-penelitian di bidang molekuler sangat menunjang perkembangan pengetahuan evolusi. Kajian-kajian evolusi dewasa ini lebih banyak ditinjau dari segi biokimiawi, genetika, dan molekuler.

Dalam tinjauan molekuler, evolusi merupakan perubahan susunan genetic pada generasi yang berurutan. Untuk mengetahui evolusi, sangat baik untuk mengetahui tentang genetika dari populasi (*population genetic*). Penelitian selama 30 tahun yang dilakukan oleh R.A. Fisher di Inggris dan S. Wright di Amerika memperlihatkan bahwa evolusi tidak mengenai sebuah gen atau suatu individu, tetapi melalui sekelompok gen atau sekumpulan individu yang disebut populasi (Sidharta, 1995). Genetika individu selalu menyangkut konsep genotype yakni konstitusi genetika pada individu. Dan jika kita katakan bahwa evolusi adalah perubahan dalam komposisi genetis dari populasi, maka yang diartikan adalah suatu perubahan dari frekuensi genetis di dalam seluruh gen (termasuk plasmagen) yang dimiliki semua individu dalam populasi tersebut (Waluyo, 2005).

Materi Pokok : Evolusi Primata

A. Perubahan Struktur Organ pada Primata (Evolusi Primata)

Evolusi manusia dan primata yang diperbincangkan saat ini bukan berarti bahwa manusia berasal dari kera. Yang dipelajari dalam ilmu evolusi adalah proses perubahannya.

Mempelajari perubahan makhluk hidup akan ditinjau dari banyak segi, yang dapat memberikan petunjuk mengenai apa yang terjadi pada masa yang lalu.

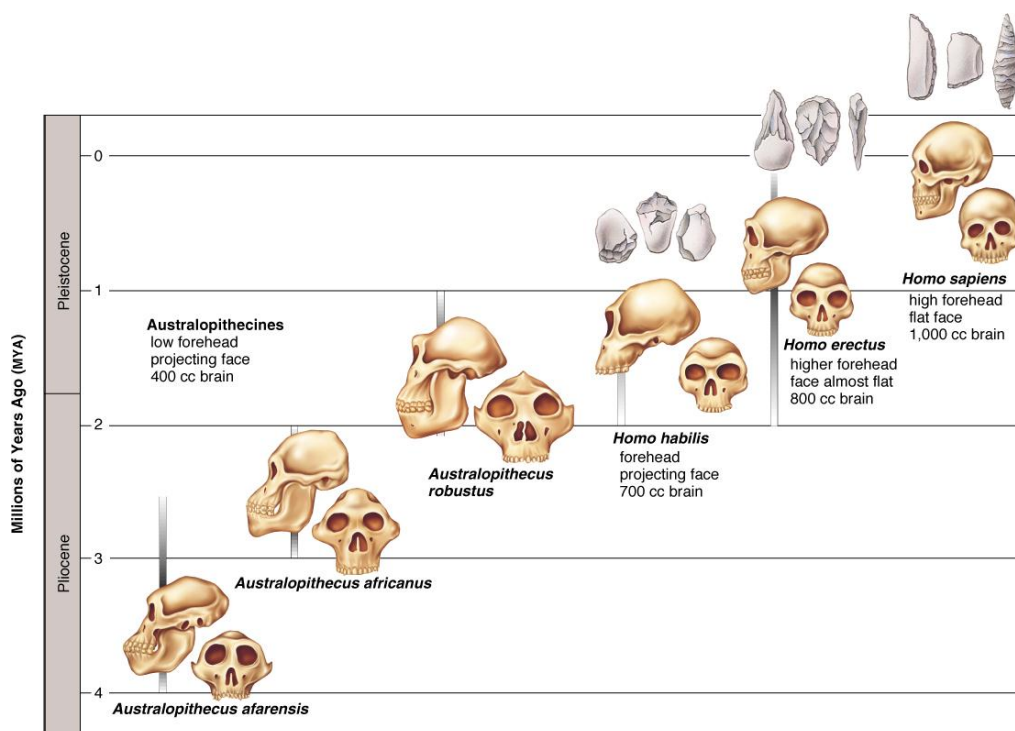
Suatu sifat akan berevolusi sesuai dengan perkembangan waktu dan tempat. Dengan membandingkan data fosil dengan makhluk hidup yang ada saat ini merupakan analisis yang dilakukan oleh para Palaentolog pada kelompok primata adalah membandingkan kelompok primata primitif dengan kelompok primata modern tentang perubahan struktur dari berbagai organ, yang minimal dapat memberikan petunjuk yaitu sebagai berikut :

1. Bentuk tengkorak yang memanjang dengan rahang yang besar. Perubahan ini diikuti dengan perubahan cara berjalan dari empat kaki menjadi dua kaki. Panggul menjadi kuat, gigi kuat dan membentuk moncong menjadi bertambah pendek. Rongga hidung semakin mengecil.
2. Mata yang semula menghadap ke samping, menjadi berangsur-angsur menghadap ke depan. Penglihatannya berubah dari dua dimensi menjadi tiga dimensi, dan kemampuan melihat warna meningkat dari hitam-putih untuk membedakan terang dan gelap menjadi mampu melihat hampir semua spektrum warna. Hal ini erat kaitannya dengan cara hidup dari malam hari menjadi siang hari. Selain itu matapun diperlukan untuk melihat makanan di antara ranting-ranting pohon, dan untuk dapat menyelip dengan mudah di antara dahan.
3. Ujung jari bercakar secara berangsur-angsur berubah menjadi kuku. Hal ini terlihat bahwa tupai mempunyai cakar, sedangkan primata lebih lanjut mempunyai kuku yang tebal dan akhirnya manusia mempunyai kuku yang tipis. Cakar mula-mula digunakan untuk mengais mencari makan. Dengan berubahnya cara hidup dari hidup di tanah menjadi kehidupan arboreal, maka cakar menjadi mengganggu kemampuan bergerak dengan cepat di atas pohon. Kehidupan arboreal lebih membutuhkan kemampuan memegang. Dengan demikian, terjadi pula perubahan cara memegang dengan terbentuknya ibu jari dengan persendian yang lain dari pada jari-jari yang lain. Hal inipun erat kaitannya dengan timbulnya flora hutan sebagai habitat baru di muka bumi. Cakar perlu untuk naik pohon, tetapi selalu terkait kalau pindah dari suatu tempat ke tempat yang lain. Selain itu terjadi pula perubahan dari telapak tangan. Pentingnya mempunyai kemampuan untuk memegang terlihat pada kera, yang mempunyai “empat tangan”, bahkan pada kera Amerika Selatan, ekorpun dapat digunakan untuk memegang.
4. Kehidupan arboreal menyebabkan fungsi tangan menjadi lebih penting daripada kaki. Hal ini terlihat pada bangsa kera yang memiliki tangan yang lebih panjang dan lebih kuat daripada kaki. Hal ini penting untuk dapat berayun-ayun dan berpindah tempat. Dengan

berubahnya permukaan bumi, maka jumlah hutan menjadi sedikit. Selain itu ditemukan primata berukuran besar yang tidak dapat ditunjang lagi oleh hutan. Dengan demikian, primata mulai turun ke permukaan bumi. Akibatnya tangan menjadi kurang diperlukan sedangkan kaki diperlukan untuk mengejar mangsa dan menghindarkan diri dari predator. Koordinasi otot menjadi lebih baik.

Volume otak mengalami perubahan yang pesat. Faktor ini sangat nyata terlihat pada golongan kera manusia. *Australopithecus* hanya mempunyai otak dengan volume 600 cc, sedangkan manusia modern sekitar dua kali lebih besar. Data fosil menunjukkan bahwa fosil manusia lainnya mempunyai kisaran di antara keduanya. Perubahan volume otak dapat pula dilihat pada perubahan dahi, yang tidak ada pada kera dan hampir tegak pada manusia.

Karena manusia adalah makhluk yang berakal membuat informasi non-genetik yang diturunkan semakin kompleks sehingga pembahasan perkembangan evolusi manusia ditinjau dari aspek psiko-sosial dari makhluk bipedal sampai *Homo sapien*. Beberapa fosil primata yang ditemukan pada lapisan bumi yang berbeda terlihat pada gambar 2.18



Gambar 2.16 Evolusi Manusia (sumber: Anonim, 2006)

Ciri-ciri perkembangan primata sebagai berikut:

a. Australopithecines

- Merupakan makhluk bipedal tegak yang paling tua
- Muncul 8-10 juta tahun yang lalu

- Digolongkan sebagai hominid (pra-manusia)
- *Australopithecus africanus* (5,5 juta tahun yang lalu)
- *Australopithecus afarensis* (3,5 juta tahun yang lalu)
- *Australopithecus robustus* dan *Australopithecus boisei* (2-1 juta tahun yang lalu)
- Pemakan daging dan pemakan tumbuhan
- Mengenal alat dari batu untuk berburu dan untuk melawan musuh
- *Homo habilis*, Australopithecus yang paling maju, tidak sekedar memakai alat tapi juga membuatnya

b. *Homo erectus*

- Manusia kera yang memiliki ciri-ciri manusia
- Mampu membuat alat yang lebih baik dari alat yang dibuat *Homo habilis* dengan variasi yang lebih banyak
- Alat dari batu dan kayu
- Mengenal api dan mengenal alat penghasil api
- Pemburu ulung dan sudah bermasyarakat
- *Meganthropus palaeojavanicus* (600-500.000 tahun yang lalu)
- *Homo erectus Pekinensis* (500.000 tahun yang lalu)

c. *Homo Neanthertalensis*

- Hidup sekitar 150.000-60.000 tahun yang lalu
- Mengenal alat berburu, alat mempertahankan diri, alat makan, dan alat minum
- Sudah mengenal benih-benih keperchayaan dengan ditemukanya kuburan yang dilakukan penguburan dengan cara terhormat (kepercayaan ada kehidupan sesudah mati)
- Dianggap sebagai pra-*Homo sapien*

B. Data Evolusi Primata

Ber macam-macam fosil primata seperti *Mesopithecus*, *Miopithecus*, dan *Aegyptopithecus* dari lapisan oligosen; *Parapithecus*, *Propithecus* yang berbentuk seperti bajing, diperkirakan tidak mempunyai hubungan kekerabatan yang cukup dengan manusia. Fosil primata yang paling tua dan masih termasuk famili Homonidea adalah *Dryopithecus*, *Limnopithecus*, *Brahmapithecus*, *Sivapithecus*, *Pliopithecus*, *Oreopithecus*, dan *Proconsul* yang dikenal sejak jaman Miosin.

Dryopithecus dianggap berkerabat dengan bangsa beruk dan kera, sedangkan *Proconsul*, merupakan fosil Hominid tertua yang diduga berkerabat dengan gorila dan

sipanse. Fosil *Brahmapithecus* dan *Sivapithecus* belum diketahui kerabat dekatnya. Kemudian kita mengenal fosil Hominid yang lebih muda yaitu *Ramapithecus* yang dianggap sebagai fosil yang erat hubungannya dengan manusia. Fosil ini pada mulanya hanya dikenal dari sebuah tulang rahang. Namun kini pandangan tersebut berubah, karena penemuan baru telah memberikan pandangan yang lebih baik. Fosil ini ternyata identik dengan *Dropihecus*. Fosil berikutnya adalah *Kenyapithecus*.

Fosil Homo mungkin pula telah ada, namun data yang ada belum meyakinkan. Baru kemudian, pada lapisan yang lebih muda, mulai dijumpai *Paraustralopithecus aethiopicus*, yang kemudian oleh para ahli yang beraliran progresif sekarang disebut juga *Homo aethiopicus*, *Australopithecus* (*A. africanus*, *A. aferensis*), *Homo*, *Megathropus paleojavanicus* (*Homo mojokertensis*), dan *Paranthropus* (*P. boisei*, *P. robustus*). Kedua marga fosil terakhir dan *Gigantopithecus* adalah fosil manusia atau kera berukuran besar dan mungkin pantas dinamakan raksasa. Fosil-fosil yang menempati lapisan lebih atas adalah *Zijanthropus*, *Homo habilis*, *Homo ergaster*, *Homo rudolfensis*. Baru kemudian kita mengenal manusia purba, *Homo erectus* (*Sinanthropus*, *Pithecanthropus*, *Atlanthropus*, *Telanthropus*, *Eoanthropus*, dan *Homo hidelbergensis*). Fosil-fosil Hominid yang paling muda semuanya sudah dianggap sebagai *Homo sapiens* (*Swancombe*, *Steinheim*, *Cromagnon*), dan *Homo sapiens neanderthalensis* (*Homo soloensis*, *Homo rhodesiensis*).

C. Data Genetika Molekuler Fosil Primata

Pendekatan molekuler dilakukan oleh sekelompok peneliti dari universitas California di Berkeley. Tahun 1987 mereka mengemukakan hasil analisis ADN mitokondria yang menunjukkan bahwa ADN mitokondria manusia yang paling primitif (wanita, karena ADN mitokondria diturunkan dari pihak ibu) terdapat di Afrika. Bila dikaji mengenai kecepatan mutasi ADN mitokondria, dan dikaitkan dengan perubahan yang terjadi, maka dapat disimpulkan bahwa manusia yang paling primitif harus sudah berada di muka bumi sekitar 200.000 tahun yang lalu. Hal ini menimbulkan kontroversi dengan data fosil, karena menurut fosil, *Homo sapiens* pertama berumur paling sedikit sekitar 250.000-1.000.000 tahun yang lalu. Apalagi bila kita membaca buku yang lebih tua, maka dapat kita menemukan bahwa perkiraan manusia pertama adalah sekitar 15.000.000 tahun yang lalu.

Penelitian tandingan dilakukan oleh kelompok lain dengan menggunakan analisis ADN kromosom Y menunjukkan bahwa pria pertama berasal dari daerah aka Afrika, di tempat suku Pygmees berada. Pendekatan tersebut di atas, meskipun mengarah pada Afrika sebagai daerah asal manusia, sangat didukung oleh data fosil.

Meskipun data molekuler sangat cocok dengan data fosil, namun data yang masih ada belum cukup untuk memastikan asal-usul manusia. Teori lain menyatakan bahwa manusia pertama mungkin adalah hibrit antara manusia primitif (*Homo erectus* dengan *Homo habilis* dan *Homo neanderthalensis*) dan dihasilkan manusia modern yang hidup sekarang. Pendapat lain mengatakan bahwa asal usul manusia terjadi di Afrika dan Asia. Adapula kemungkinan yang jauh lebih kecil yakni di Eropa dan Australia. Pendapat ini didasarkan pada fosil *Homo erectus* dan fosil *Homo sapiens*.

D. Sejarah Manusia

Sejarah manusia adalah asal-usul manusia. Fakta atau bukti yang diperoleh untuk mempelajari sejarah manusia dengan bantuan fosil yang ditemukan pada lapisan bumi. Dari fosil-fosil yang ditemukan, didapatkan kesimpulan bahwa deretan-deretan fosil yang terdapat dibatuan muda berbeda apabila dibandingkan dengan fosil dari batuan yang lebih tua. Perbedaan itu disebabkan oleh perubahan yang berlahan-lahan. Cara penyebaran hewan dan tumbuhan dapat membuka tabir mengenai perubahan-perubahan yang terjadi pada moyangnya.

Dalam pembicaraan mengenai asal-usul manusia pada bahasan berikut ini dilihat dari kaca mata biologi. Tentu saja, ada pandangan-pandangan lain yang mengungkapkan tentang timbulnya manusia di bumi ini. Karena kita ingin mengungkap sejarah manusia dari segi Biologi, maka sudah barang tentu kita akan menjelaskan dari sudut logika materi biologi yang telah kita ketahui.

Klasifikasi makhluk hidup dengan menggolongkan manusia dengan hewan Vertebrata, yakni sebagian dari mamalia. Bila kita membedah tubuh manusia, bagian-bagian tubuhnya seperti jantung, usus, hati dan paru-paru tidak banyak berbeda dengan jantung, usus, hati dan paru-paru kucing atau kerbau. Dengan demikian pula dapat kita pelajari sistem saraf, sistem endokrin, pernafasan, pencernaan, reproduksi atau kontraksi otot-ototnya, kita akan selalu menemukan proses-proses kimia dan fisika yang pada prinsipnya sama seperti yang terdapat pada hewan. Manusia mempunyai rambut dan bisa menyusui anaknya. Manusia mempunyai gerakan bipedal(Latin: bi = dua, dan pedes = kaki) yang berlainan dengan gerakan mamalia lainnya. Bagian-bagian anatomi manusia dan kerbau sangat serupa, oleh karena itu mereka dimasukkan kedalam suatu golongan yakni ordo primate.

Setiap spesies memiliki ciri-ciri khas yakni ciri struktur, ciri fisiologi dan ciri tingkah laku yang membedakan spesies yang berlainan tetapi yang dekat hubungan kekerabatannya. Meskipun dalam individu dalam spesies manusia banyak terdapat keanekaragaman, spesies

Manusia dapat dibedakan dengan jelas dari hewan yang paling menyerupai, yakni Primata besar lainnya.

E. Ciri-ciri Struktur Manusia

Perbedaan jasmani yang mencolok pada manusia dan hewan adalah dalam hal kemampuan manusia untuk berdiri, berjalan dan berlari. Oleh karena itu, tangan manusia bebas untuk mengerjakan atau untuk membawa sesuatu. Kemampuan ini banyak menyangkut modifikasi anatomi. Kaki manusia lebih panjang dari pada lengannya, sesuatu hal yang membedakan dari primate lainnya. Kaki manusia, yang mempunyai lekukan besar dengan ibu jari yang sebidang letaknya dengan jari lainnya, sangat berbeda dengan kaki kera. Kaki manusia sesuai untuk berkejar atau berlari, akan tetapi tidak sesuai untuk berpegangan pada dahan-dahan pohon. Kepala manusia terletak pada tulang belakang sedemikian rupa, sehingga memungkinkan manusia untuk dapat melihat lurus ke depan jika berdiri tegak.

Otak manusia relatif besar. Manusia masa kini mempunyai volume tempurung otak besar 1200 sampai 1.500 cc; tempurung otak simpanse hanya 350 sampai 450 cc. Tidak ada hubungan mutlak antara besarnya ukuran otak dengan kecerdasan. Individu yang mempunyai otak terbesar belum tentu merupakan individu yang tercerdas. Namun tidak dapat disangkal bahwa otak manusia mempunyai kemampuan besar untuk belajar. Ciri-ciri kepala manusia lainnya adalah muka yang tegak lurus, rahang yang tidak begitu menonjol, dagu yang nyata, hidung yang jelas dengan ujung memanjang dan bibir yang mempunyai selaput lendir di bagian luar.

Tubuh manusia mempunyai penyebaran rambut yang istimewa. Penyebaran rambut ini berbeda-beda pada berbagai macam populasi manusia. Kaum pria dari beberapa populasi manusia mempunyai janggut lebat. Banyaknya rambut pada tubuh berbeda-beda, begitu pula rambut pada lengan dan kaki. Kita hanya dapat mengira-ngira apa artinya adaptasi penyebaran rambut demikian itu dan sampai sekarang pemikiran-pemikiran semacam itu tidak mempunyai arti sama sekali.

1. Kemampuan Jasmani

Gambaran mengenai batas-batas kemampuan jasmani manusia dapat dilihat dari hasil-hasil pertandingan olah raga. Misalnya untuk lari jarak pendek (100 m), manusia dapat mencapai lari 36 km per jam. Banyak macam hewan dapat lari lebih cepat daripada manusia. Hewan-hewan ini mempunyai kaki yang lebih panjang daripada kaki manusia dalam perbandingan tubuhnya. Macan tutul dapat mengejar kijang dengan kecepatan lebih dari 100 km per jam. Biasanya berat jenis tubuh manusia lebih rendah daripada berat jenis air. Karena itu, di laut tenang dapat terapung untuk jangka waktu lama. Manusia dapat berenang dengan

baik. Untuk jarak 100 m manusia dapat berenang dengan kecepatan rata-rata 6,8 km per jam. Bahkan dengan bantuan alat-alat di tangan dan di kaki pun kemampuan berenang manusia masih jauh dibawah kemampuan ikan pedang yang dapat membelah air dengan kecepatan 64 km per jam atau kempuan kura-kura laut atau ikan paus yang dapat berenang dengan kecepatan 25 km per jam.

Perbandingan-perbandingan di atas menunjukkan bahwa kemampuan jasmani manusia jauh di bawah kemampuan jasmani hewan. Tetapi manusia mempunyai kecakapan yang jauh lebih tinggi dari pada hewan. Karena keakapan ini, manusia mampu menggunakan alat inderanya yang paling sempurna yakni alat pelihat dengan sebaik-baiknya. Manusia dapat menafsirkan rangsangan yang diterima dan mempunyai pikiran yang tidak terhingga banyaknya dalam mengadakan reaksi terhadap apa yang dialaminya.

2. Ciri-ciri Fisiologi

Sebagian besar keunggulan struktur manusia lebih banyak berhubungan dengan cirri tingkah lakunya daripada dengan ciri fisiologi, meskipun memang kadang-kadang sukar untuk membedakan kedua hal ini. Secara fisiologik manusia tidak banyak berbeda dari mamalia lainnya, terutama primata. Karena itu dalam banyak hal untuk mempelajari fisiologi manusia dapat menggunakan percobaan-percobaan dengan Mamalia.

Pada manusia terdapat musim berbiak. Kegiatan reproduksi dapat terjadi setiap saat sepanjang tahun. Populasi manusia banyak dijumpai individu pada hari lahir pada semua bulan dalam setiap tahun. Pada kera dan sebangsanya terdapat terdapat kecenderungan tidak adanya musim tertentu dalam reproduksi. Kebanyakan hewan yang dipelihara oleh Manusia cenderung mempunyai cirri fisiologi yang sama dengan Manusia, meskipun daalam bebas tetap mempunyai musim berbiak.

Tidak banyak hewan memiliki umur panjang. Hal ini disebabkan oleh cirri fisiologi pada umur tua menjadi lemah, dan organisme tua lebih muah untuk dibunuh oleh predator atau parasit. Hal inilah yang mempersulit penentuan umur sesungguhnya pada kebanyakan organisme. Tetapi dari catatan kebun binatang dan akuarium, yang hewannya terlindung diperoleh data melalui kemungkinan umur yang dapat dicapai oleh berbagai spesies hewan. Ternyata banyak penyu besar yang mempunyai umur lebih panjang daripada manusia. Umur rata-rata manusia mungkin lebih panjang daripada umur hewan.

Manusia mempunyai umur panjang, tetapi memerlukan jangka waktu lama untuk menjadi dewasa, banyak hewan yang menetas dan lahir telah dapat berdiri sendiri. Anak mamalia paling banyak memerlukan waktu beberapa minggu atau beberapa bulan sebelum dapat mengurus dirinya sendiri, oleh karena masih harus mendapatkan makanan dari susu

ibunya. Anak manusia selama 6-9 tahun sama sekali bergantung pada orang dewasa setelah itu untuk beberapa waktu ia masih bergantung oleh manusia dewasa meskipun berkurang, yang mendekati keadaan ini adalah kera besar. Anaknya memerlukan sekitar 2 tahun untuk hidup berdiri sendiri. Manusia meningkan pada sekitar umur 14 tahun dan era sekitar 10 tahun. Perkembangan manusia mencapai kesempurnaan pada sekitar 10 tahun, sedangkan pada kera umumnya pada umur 12 tahun.

3. Ciri-ciri tingkah laku

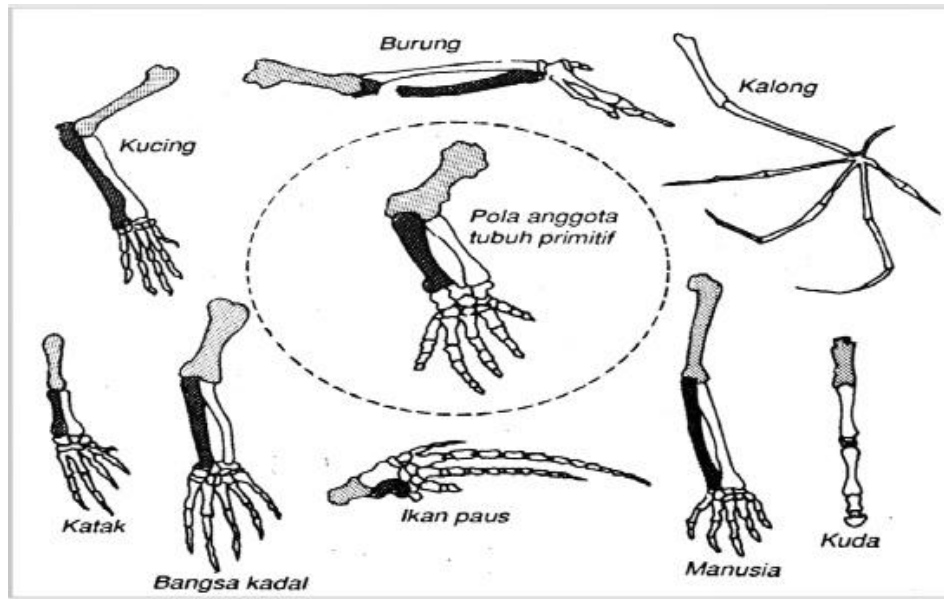
Manusia tidak berdaya sebagai individu sendiri, walaupun memiliki otak yang besar, biasanya manusia hidup bersama-sama membentuk masyarakat. Begitu juga dengan hewan banyak yang hidup bermasyarakat, misalnya serangga, masyarakat serangga berdasarkan tingkah laku yang merupakan sifat bawaan dan sedangkan masyarakat manusia berlandaskan pola tingkah laku yang dipelajarinya sedangkan masyarakat kera kurang teratur walaupun dibandingkan dengan masyarakat manusia yang paling sederhana.

Hal yang penting membedakan manusia dengan hewan adalah bahasa walaupun manusia dapat melakukan komunikasi melalui isyarat, tetapi untuk menggantikan bahasa atau dipakai untuk menekankan sesuatu, bahasa manusia sangat rumit karena tidak hanya terdiri dari sistem teriakan dan panggilan. Bahasa adalah dasar dari kemanusiaan namun kita belum dapat mengetahui kapan manusia dapat berbicara dan tidak adanya keterangan mengenai bagaimana bahasa itu dimulai, bahasa adalah suatu ciri tingkah laku manusia.

A p l i k a s i k o n s e p

Setelah mempelajari konsep-konsep tentang petunjuk dan bukti evolusi yang dijelaskan pada langkah eksplorasi dan pengenalan konsep, maka untuk memantapkan konsep-konsep tersebut diskusikan dan jawablah pertanyaan pada tahap aplikasi di bawah ini!

1. Sebutkan bukti-bukti petunjuk adanya evolusi!
2. Sebutkan fakta-fakta yang menyebabkan adanya evolusi!
3. Mengapa makhluk hidup mempunyai persamaan dan perbedaan?
4. Mengapa fosil dapat dijadikan bukti adanya evolusi? Jelaskan dengan contoh!
5. Gambar Homologi anggota tubuh bagian depan dari berbagai macam hewan



Pertanyaan-pertanyaan :

- Apakah persamaan yang dapat diamati pada anggota depan binatang yang terdapat pada gambar !
- Perbedaan apa saja yang dapat diamati dari anggota depan berbagai binatang vertebrata tersebut ?
- Apabila anda perhatikan semua anggota depan binatang yang terdapat pada gambar tersebut, apakah anggota depan berasal dari bentuk asal yang sama, jelaskan ?
- Apabila diperhatikan mulai dari bentuk primitif, tampak adanya perubahan struktur. Menurut pendapat anda, apakah perlunya terjadi perubahan struktur pada berbagai binatang tersebut, jelaskan ?
- Apakah gambar tersebut menunjukkan contoh homologi, dengan mempelajari gambar tersebut, apakah yang dimaksud dengan homologi ?
- Apakah sayap burung dan sayap serangga termasuk homologi ? Mengapa ?